

Verwendung von Kupfer-Molybdän-Pseudolegierungen für die laserbasierte additive Fertigung von Multimaterial-Verbindungen

P. Neef, R. Bernhard, H. Wiche, V. Wesling

Clausthaler Zentrum für Materialtechnik, Technische Universität Clausthal

philipp.neef@tu-clausthal.de

Abstract

Pulverbasierte additive Fertigungsverfahren von Metallen erlauben durch neue Freiheitsgrade eine Vielzahl von innovativen Anwendungsmöglichkeiten. Insbesondere Funktionsintegration und Topologieoptimierungen lassen sich in Strukturen realisieren, die mit konventionellen Fertigungstechnologien nicht oder nur mit großem Aufwand hergestellt werden können. Gleichwohl beschränkt sich das potenzielle Werkstoffportfolio auf wenige Pulverwerkstoffe der Anlagenhersteller, welche nur einen kleinen Ausschnitt der vielfältigen Möglichkeiten zur Werkstoffeinstellung bieten. Dementsprechend stellt die Werkstoffauswahl in vielen Fällen nur einen Kompromiss für den jeweiligen spezifischen Anwendungsfall dar. Dabei bieten Pulverwerkstoffe deutliche Vorteile hinsichtlich der gezielten Einstellbarkeit der Zusammensetzung zur Erreichung definierter Eigenschaftsprofile.

Im Rahmen des EFRE geförderten niedersächsischen Innovationsprojektes wGROTESK (Werkstoffentwicklung zur generativen Fertigung von optischen, thermalen und strukturellen Komponenten) wird die Auswahl und gezielte Einstellung eines anwendungsspezifischen Werkstoffes gekoppelt mit der prozesstechnischen Verarbeitung in einem LMD-Prozess betrachtet. Für die generative Fertigung von Werkstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit, niedrigem Schmelzpunkt und niedriger Wärmeausdehnung zum additiven Einfassen von Nd:YAG-Kristallen wurde der Transfer von Kupfer-Molybdän-Verbundwerkstoffen in den additiven Fertigungsprozess durchgeführt.

Die Legierungsentwicklung bietet dabei den Ansatz zur Definition einer kupferbasierten Pseudolegierung zur Einbindung in einen industriellen Laserprozess. Durch die Kombination von Kupfer und Molybdän kann über einen großen Temperaturbereich ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient erreicht werden. Die geeignete Adaption des Kupferbasiswerkstoffes erlaubt darüber hinaus weitreichende Möglichkeiten zur Einstellung der Werkstoffeigenschaften sowohl über den Matrixwerkstoff der Pseudolegierung als auch über die Anbindung und Benetzung der eingebundenen Molybdänpartikel.

1 Einleitung

Der niedersächsische Innovationsverbund GROTESK („Generative Fertigung optischer, thermaler und struktureller Komponenten“) als Kooperation von Leibniz Universität Hannover, Hochschule Hannover, Laser Zentrum Hannover e.V. und Clausthaler Zentrum für Materialtechnik befasst sich in verschiedenen Teilprojekten mit der additiven Fertigung eines gesamten Lasersystems. Der Schwerpunkt des Teilprojektes wGROTESK liegt dabei auf der Werkstoffentwicklung für die laserbasierte metallische generative Verarbeitung mittels industriellem Infrarot-Laser.

Hierbei werden im pulverbasiertem Laser Metal Deposition Prozess (LMD) Strukturen hergestellt, die basierend auf den Anforderungen der optischen Komponenten definierte Eigenschaften erfüllen müssen. Insbesondere muss berücksichtigt werden, dass ein additives Einfassen eines kristallförmigen laseraktiven Mediums eine Multimaterialverbindung eines metallischen und eines nichtmetallischen Werkstoffes darstellt. Demzufolge müssen sowohl die Anbindung inkompatibler Werkstoffe sichergestellt werden als auch spezifische Eigenschaften der Legierung betrachtet werden, sodass keine Schädigungen der kristallinen Strukturen auftreten.

Bestehende Werkstoffe für derartige LMD-Anlagen sind meist Bestandteil des Portfolios der Anlagenhersteller und bieten häufig nur einen Kompromiss hinsichtlich der erforderlichen Werkstoffeigenschaften für den angedachten Anwendungsfall an.

Als Alternative werden im Projekt Pulverwerkstoffe entwickelt, die durch eine gezielte Adaption in ihren Eigenschaften dem angestrebten additiv gefertigten Lasersystem angenähert werden. Die Zielsetzung der nachfolgenden Ausarbeitung besteht in der Entwicklung einer metallischen Legierung mit einem niedrigen Schmelzpunkt und einer thermischen Ausdehnung, die derer von Yttrium-Aluminium-Granat als laseraktivem Medium entspricht, wobei zugleich die Anbindung der beiden inkompatiblen Werkstoffe durch hinreichend große chemische Interaktion sichergestellt werden soll.

2 Wissenschaftliche Grundlagen

Die Halterung von kristallinen laseraktiven Medien (bspw. Nd:YAG) erfolgt konventionell über eine formschlüssige Fixierung. Hierbei wird der Kristall beispielsweise in Kupferhalbschalen eingepresst, wobei zusätzlich Indiumfolie zur Überwindung der Rauheit zwischen den Fügepartnern eingelegt wird, um die Wärmeleitung zu verbessern [1, 2]. Additiv eingedruckte Kristalle erfordern zur stoffschlüssigen Halterung eine werkstofftechnische Anpassung der zu verwendenden Legierung auf den Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall (YAG). Schädigungen des laseraktiven Mediums sollen

dadurch sowohl bei Kontakt zur flüssigen Metallschmelze als auch nach dem Abkühlen des Bauteils vermieden werden.

Zur Gewährleistung einer robusten Halterung und gleichzeitig guter Wärmeabfuhr ist es erforderlich, dass die gewählte Legierung gegenüber dem YAG eine möglichst hohe Benetzung aufweist. Gleichzeitig ist ein niedriger Schmelzpunkt entscheidend, um eine thermische Schädigung zu vermeiden. Insbesondere ist hierbei die niedrige Thermoschockbeständigkeit des YAG von etwa 80 K zu berücksichtigen, welche starke Temperaturschwankungen für eine prozesssichere Handhabung ausschließt [3].

Ein weiterer bedeutender Aspekt für die Auswahl des Werkstoffs ist sowohl eine geeignete Wärmeleitfähigkeit zur Abfuhr der Verlustwärme im Kristall als auch eine auf den YAG abgestimmte Wärmeausdehnung, sodass beim Abkühlen der additiv gefertigten Multimaterial-Verbindung eine Schädigung durch induzierte mechanische Spannungen verhindert wird.

Metallische Werkstoffe mit niedrigem thermischem Ausdehnungskoeffizienten werden bereits seit vielen Jahren erfolgreich in der additiven Fertigung eingesetzt [4, 5]. Dazu werden für Anwendungsfälle mit niedriger Wärmeausdehnung insbesondere Werkstoffe auf Eisen-Nickel-Basis verwendet, die als Invar bzw. Kovar am Markt in verschiedenen Werkstoffformen verfügbar sind. Der Ausdehnungskoeffizient dieser Legierungen bei Raumtemperatur beträgt je nach Zusammensetzung zwischen $1\text{--}5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [6]. Allerdings steigt dieser bei Temperaturen ab 300 °C deutlich an auf über $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [7]. Gleichzeitig weisen derartige Legierungen Schmelztemperaturen von über 1400 °C auf. In vorangegangenen Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine Verarbeitung und In-situ-Legieren von FeNi-Legierungen im LMD-Prozess grundsätzlich möglich sind. Beim Kontakt mit Quarzglaslinsen und YAG ist es allerdings zu Schädigungen gekommen, die sich auch mit Vorwärmung der Komponenten nicht vollumfänglich vermeiden lassen [vgl. 8].

Basierend auf diesen Kenntnissen ist der Fokus auf weitere Werkstoffe gelegt worden. Insbesondere Werkstoffe wie Molybdän und Wolfram zeichnen sich dabei durch eine jeweils niedrige thermische Ausdehnung aus. Jedoch weisen diese Werkstoffe Schmelzpunkte auf, die weit oberhalb des Yttrium-Aluminium-Granats liegen und damit von vornherein für eine technische Umsetzung ungeeignet sind.

Dies lässt sich durch den Einsatz von Pseudolegierungen ändern. Es handelt sich hierbei um eine mikroskopisch-heterogene Verbindung von Werkstoffen, die sich nicht homogen vermischen lassen, zur Kombination der Eigenschaften der beteiligten Elemente. Etabliert sind Kupfer-Molybdän Pseudolegierungen, die sowohl die gute Wärmeleitung des Kupfers mit der niedrigen Wärmeausdehnung des Molybdäns kombinieren. Die

konventionelle Prozessroute sieht einen zweistufigen Prozess vor, bei dem zunächst die Molybdänkörner gesintert werden und anschließend der poröse Körper mit Kupfer infiltriert wird [9, 10].

Ein Transfer der konventionellen Verarbeitung von Kupfer-Molybdän-Pseudolegierungen auf eine additive Prozessroute lässt sich nicht sinnvoll realisieren. Der zweistufige Prozess aus Sintervorgang und Infiltration muss in Hinblick auf das LMD-Verfahren dahingehend angepasst werden, dass die beiden Pulverwerkstoffe simultan der Prozesszone zugeführt werden. Gleichzeitig erfordert die hohe Sintertemperatur des Molybdäns von über 1600 °C ein Umdenken bezüglich des erreichbaren Gefüges. Die Zielstellung liegt darin, ohne die Erzeugung von Sinterbrücken dennoch eine niedrige thermische Ausdehnung der Pseudolegierung zu gewährleisten.

Ein Pulvergemisch aus Kupfer und Molybdän stellt zunächst eine Verbesserung der Prozessierbarkeit im Infrarot-LMD-Verfahren dar. Reines Kupfer weist für Wellenlängen um 1064 µm bei Raumtemperatur (RT) eine Absorption von etwa 5% auf (vgl. Abb. 1a nach [11]). In Kombination mit der hohen Wärmeleitfähigkeit bedeutet dies, dass nur ein geringer Anteil der Laserleistung für das Aufschmelzen nutzbar ist und die eingebrachte Wärme umgehend aus der Prozesszone abgeleitet wird. Gleichzeitig steigt die Absorption direkt vor Erreichen der Schmelztemperatur (SP) sprunghaft an, woraus Spritzerbildung und ein instabiler Prozess resultieren. Die Anwendung von Molybdän bietet hierbei den Vorteil einer deutlich höheren Absorption für infrarote Wellenlängen bei Raumtemperatur (vgl. Abb. 1b nach [11, 12]). Dies ermöglicht die Verwendung von verringerter Laserleistung zum Einbringen der Wärme und einer Wärmeleitung zum Kupfer, um dieses indirekt in die schmelzflüssige Phase zu überführen.

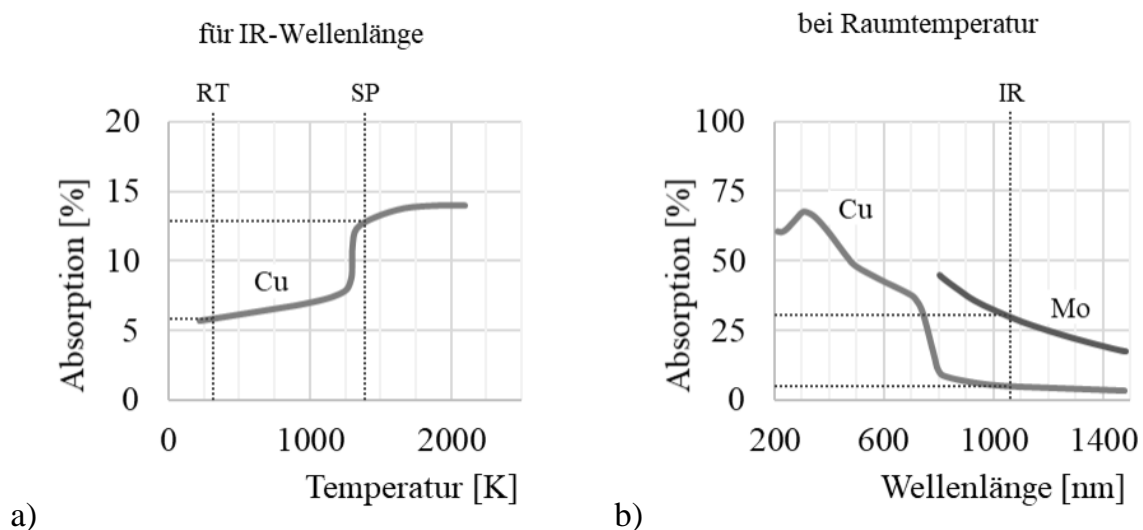


Abb. 1: Einfluss von Temperatur (a) und Wellenlänge (b) auf die Absorption nach [11, 12]

Die Anwendung von Verbundwerkstoffen im LMD-Prozess befasst sich dabei bislang mit Verschleißschutzschichten bestehend aus Matrixwerkstoff und eingefassten Keramik- oder Hartpartikeln. Funktionelle additive gefertigte Komponenten sind aufgrund fehlender Werkstoffsysteme bislang noch nicht realisiert.

3 Experimenteller Aufbau

Neben den Versuchen der additiven Fertigung, welche an einer Laserpulverauftragsschweißanlage mit einem 680 W Diodenlaser erfolgen, wird die Werkstoffentwicklung zusätzlich auch unter quasistatischen thermalen Bedingungen ofenbasiert untersucht. Die Pulverbestandteile werden dabei übereinandergeschichtet, sodass das aufschmelzende Kupfer das Molybdän infiltrieren kann. Durch die unterschiedlichen Prozessbedingungen kann der Einfluss der divergenten Aufheiz- und Abkühlbedingungen gegenübergestellt und qualifiziert werden.

Für die Generierung im Ofen werden in einer Dataphysics OCA Tropfenkonturanalyse zusätzliche Proben generiert. Durch einen integrierten Ofen vom Typ HTFC 1800 können unter Schutzgasatmosphäre Temperaturen von 1800 °C erreicht werden bei gleichzeitiger kamerabasierter Aufnahme der Prozesszone. Dies ermöglicht eine simultane Beobachtung der sich ausbildenden Schmelze während des Erwärmens der metallischen Pulver. Die Versuche werden unter Argon-Atmosphäre bei einem Volumenstrom von 250 l/h durchgeführt. Die Temperatur wird individuell oberhalb der Schmelztemperatur der verwendeten Legierung eingestellt.

Über eine Detektion der Kontur des ausgebildeten Schmelzetropfens können mit Definition der Substratoberfläche automatisiert die Kontaktwinkel zur Benetzung errechnet werden, sodass die Zielstellung der geeigneten Anbindung quantitativ überprüft werden kann. Gleichzeitig lässt sich die Schmelztemperatur der Legierung ermitteln.

Die Schliffe der erzeugten Proben werden im Nachgang mittels Auflichtmikroskopie sowie FESEM näher untersucht hinsichtlich der sich ausbildenden Gefüge und Grenzschichten.

4 Ergebnisse

4.1 Benetzung von Kupfer-Phosphor auf Molybdän

Der Fokus der Probengenerierung liegt zunächst auf der Tropfenkonturanalyse unter quasistatischen thermalen Bedingungen. *Abbildung 2a)* zeigt eine CuMo-Pseudolegierung mit einem Molybdänanteil von rund 70 wt%. Auffällig ist die große Anzahl an

Imperfektionen, die sich durch die schwarzen Flächen im Schliff darstellen. Dies legt nahe, dass die Benetzung des Kupfers und Kapillareffekte zwischen den Molybdänpartikeln nicht ausreichend sind, um das Molybdän vollständig zu benetzen. Zur Generierung von additiven Strukturen mit hohem Formfüllungsgrad ist ein derartiges Gefüge ungeeignet. Zur Steigerung der Benetzbarkeit wird dem Matrixwerkstoff Kupfer ein geringer Anteil Phosphor beigemischt. Derartige Werkstoffe mit Phosphoranteile bis 8 wt% werden aufgrund ihrer kapillaraktiven, guten Fließeigenschaften als Lote eingesetzt [13, 14]. In Verbindung mit 70 wt% Molybdän zeigt sich in *Abb. 2b*), dass die Formfüllung signifikant verbessert werden kann.

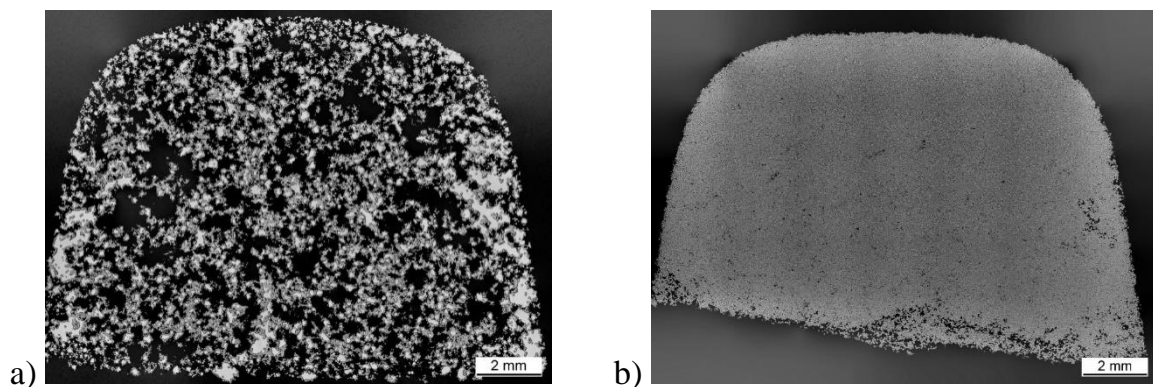


Abb. 2: Schliffaufnahmen der Infiltrationsproben: a) 70 wt% Molybdän mit Kupfer b) 70 wt% Molybdän mit CuP8

Die verbesserte Benetzbarkeit lässt sich auch anhand von Kontaktwinkelmessungen erkennen. In *Abb. 3* ist die Benetzung von reinem Kupfer auf Molybdän dargestellt. Der Kontaktwinkel beträgt etwa 40° . Durch die Erhöhung des Phosphorgehaltes im Matrixwerkstoff kann die Anbindung an das Molybdän sukzessiv erhöht werden. Aus *Abb. 4* lässt sich entnehmen, dass bereits durch 1 wt% Phosphor im Kupfer ein deutlicher Unterschied auftritt. Bei 8 wt% Phosphor erreicht die Benetzung ideale Werte.

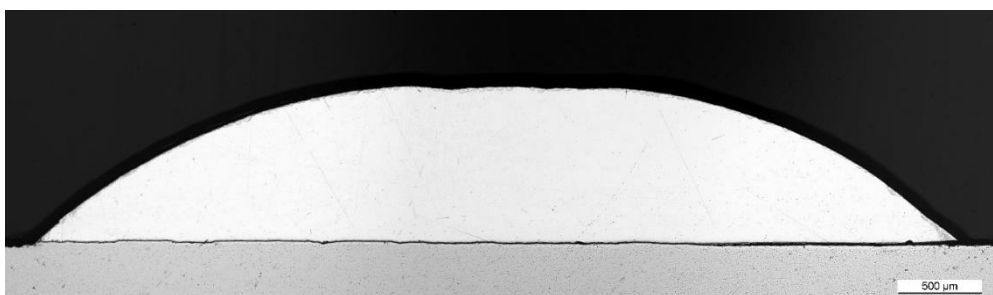


Abb. 3: Schliffaufnahmen der Benetzung von reinem Kupfer auf Molybdänsubstrat

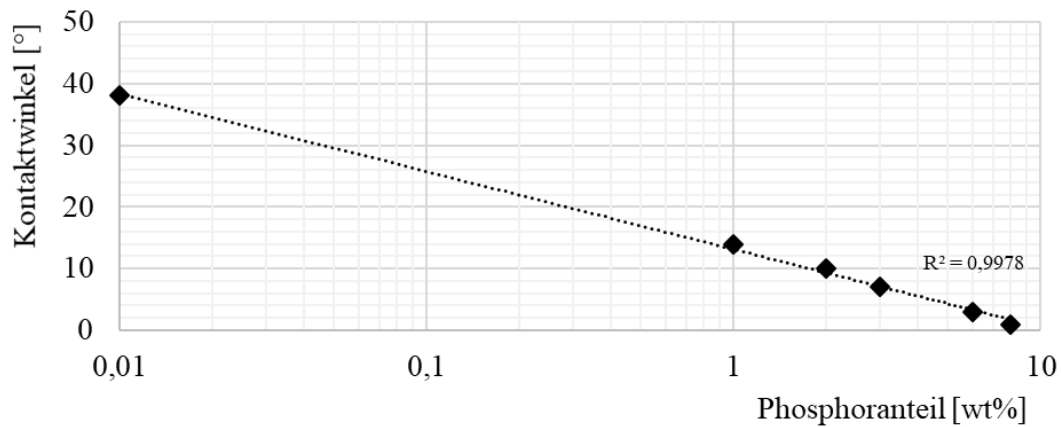


Abb. 4: Kontaktwinkel auf Molybdänsubstrat in Abhängigkeit vom Phosphoranteil im Kupfer

Einhergehend mit der verbesserten Benetzung liegt ein weiterer Vorteil der Beimischung von Phosphor in der Reduktion des Schmelzpunktes. Bei etwa 8 wt% Phosphor weist das Binärsystem Cu-P einen eutektischen Punkt mit einem Schmelzpunkt von etwa 714 °C auf. Im Vergleich zum Schmelzpunkt von Kupfer bei 1084 °C bedeutet dieser Unterschied eine weitaus geringere thermische Belastung beim additiven Einfassen des YAG-Kristalls und somit eine geringere Gefahr einer thermischen Schädigung. Die definierten Zielstellungen (ausreichende chemische Benetzbarkeit des Refraktärmetalls Molybdän, niedriger Schmelzpunkt des Matrixwerkstoffes) werden mit dem gewählten Legierungssystem somit erfüllt.

Abbildung 5a) zeigt das resultierende Gefüge der ofenbasiert generierten Proben mit 70 wt% Molybdän auf. Es lässt sich mittels EDX-Messungen im FESEM nachweisen, dass neben der physikalischen Benetzung darüber hinaus auch eine chemische Interaktion zwischen CuP-Matrix und Molybdänkörner stattfindet. Um die Körner herum bzw. zwischen kontaktierenden Körnern bildet sich ein Saum aus Molybdän-Phosphor-Phasen unterschiedlicher Zusammensetzung (vgl. Abb. 5b). Dabei können MoP, Mo₃P und Mo₄P₃ detektiert werden. Bedingt durch niedrige Temperaturgradienten erfolgen ausgeprägte Diffusionsvorgänge an den Grenzflächen der Molybdänpartikel.

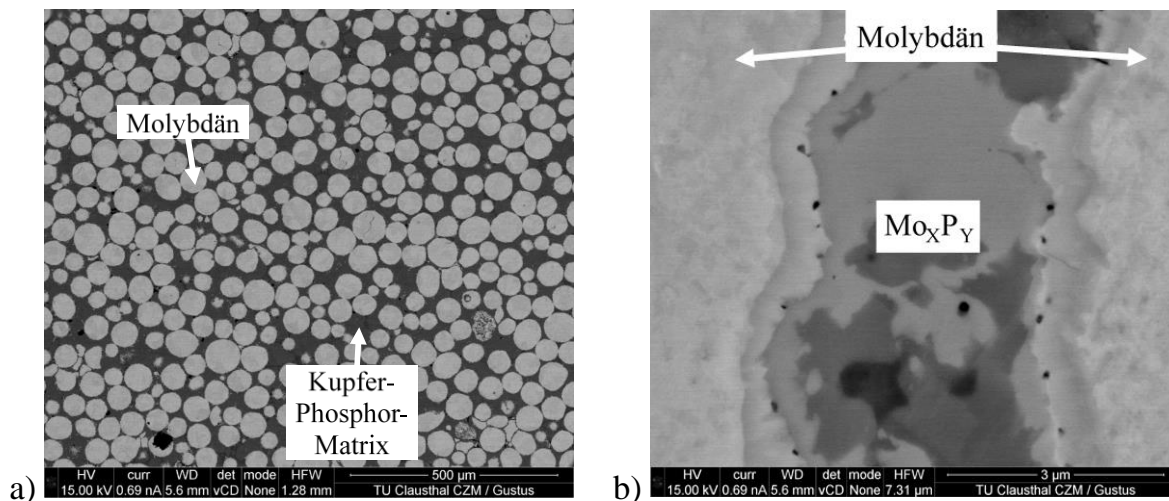


Abb. 5: FESEM-Aufnahme: CuPMo-Pseudolegierung (a) und vergrößerte Betrachtung der Grenzschicht zwischen Molybdänkörnern (b)

4.2 Benetzung von Matrixwerkstoff auf YAG

Im Gegensatz zur Benetzung eines Systems Metall-Metall stellt die Realisierung von Metall-Nichtmetall eine größere Herausforderung dar. Dies resultiert aus grundsätzlich inkompatiblen Werkstoffsystemen, die sich nur kompliziert durch die Verwendung geeigneter Flussmittel verbinden lassen. Für die technische Umsetzung werden geringe Anteile Mangan zum Kupfer-Phosphor zugegeben. Im Vergleich zu bereits erfolgreich durchgeführten Versuchen unter Zulegieren von Titan [7] sollte diese Alternative mit der Perspektive auf eine gleichzeitige Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften erprobt werden. Die Eignung der Benetzungsfähigkeit wurde anhand der Kontaktwinkelmessung überprüft, bei der die Benetzung des YAG durch die Beimischung von Mangan zum Kupfer-Phosphor Matrixwerkstoff verbessert werden kann. Bei reinem Kupfer bzw. Kupfer-Phosphor liegt der Kontaktwinkel bei etwa 110° wohingegen mit Mangan Winkel um 90° erreicht werden können (vgl. Abb. 6 a). Hintergrund ist die verhältnismäßig hohe Affinität des Mangans für Sauerstoff, welches Bestandteil des YAG ist. Dementsprechend kommt es zur Ausbildung einer Metallisierung und damit verbundener verbesserter Benetzung [vgl. 13].

Bei der Abkühlung der Proben zeigt sich weiterhin, dass sich der erstarrte Metalltropfen von der Probe löst, dabei jedoch die Ablösung innerhalb des YAG liegt, sodass am Lot eine Kristallschicht bestehen bleibt (vgl. Abb. 6b). Dies deutet darauf hin, dass die Anbindung ausreichend ist, jedoch bedingt durch die hohe Wärmeausdehnung des Matrixwerkstoffes ohne Molybdän hohe mechanische Spannungen im Kristall induziert werden und eine Schädigung resultiert.

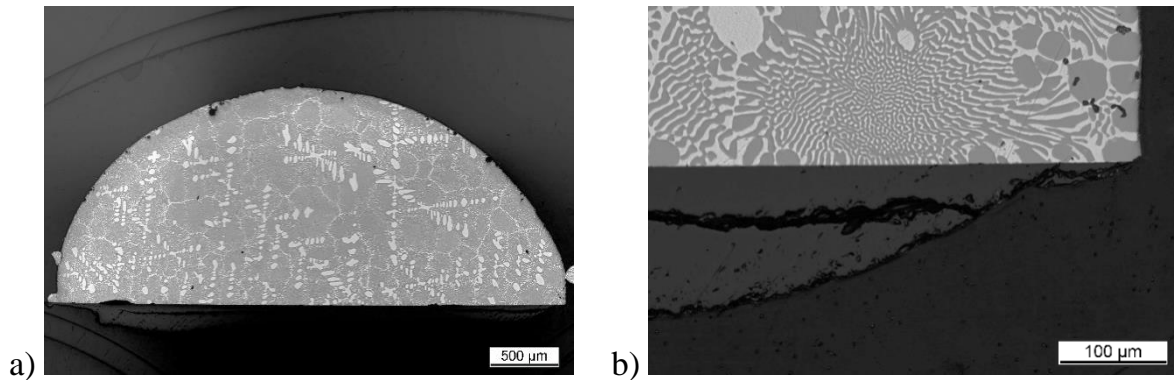


Abb. 6: Schliffaufnahmen der Benetzung von CuPMn auf YAG (a) und vergrößerte Darstellung der ausgeplatzten YAG-Anhaftung

Durch die Beimischung von Mangan kann folglich die Zielstellung einer geeigneten Anbindung von nichtmetallischem und metallischem Werkstoff deutlich besser erreicht werden im Vergleich zur Nutzung von Titan als Legierungselement.

4.3 Wärmeausdehnung der Pseudolegierung

Das verfolgte Ziel der Pseudolegierung liegt insbesondere in einer angepassten Wärmeausdehnung. *Abbildung 7* zeigt die erreichbare thermische Ausdehnung, die an den ofenbasiert generierten Proben gemessen worden sind.

Dabei wird deutlich, dass durch die Anwendung der Pseudolegierung die Wärmeausdehnungskoeffizienten mit der Anpassung der Werkstoffzusammensetzung gezielt adaptiert werden können. Die erreichten Werte liegen oberhalb des YAG, weisen aber zugleich einen annähernd parallelen Verlauf auf.

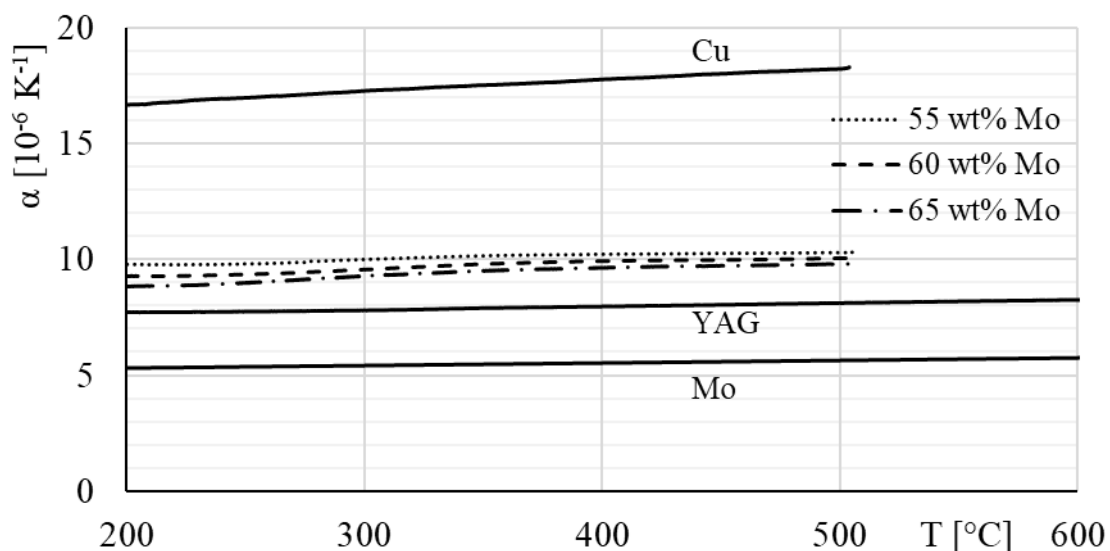


Abb. 7: Wärmeausdehnungskoeffizienten der Grundwerkstoffe und ausgewählter CuPMo-Pseudolegierungen

Demzufolge besteht beim Abkühlen während des Fertigungsprozesses in der Legierung eine leicht höhere Schwindung als im Kristall, wobei die Differenz einen linearen Verlauf aufweist. Dadurch werden innerhalb des Kristalls geringe Druckspannungen erwartet. Im Vergleich zu den Literaturwerten von Kupfer-Molybdän-Verbundwerkstoffen mit den ausgebildeten Sinterbrücken zwischen den Molybdänkörnern, liegen die ermittelten Werte der hier aufgezeigten Prozessroute leicht höher. Jedoch erfolgte der Konzeptnachweis, dass Pseudolegierungen mit angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten auch mittels additiver Fertigung herstellbar sind.

4.4 Additive Verarbeitung der Pseudolegierung

Zusätzlich zur ofenbasierten Verarbeitung ist eine Prozessierung im additiven LMD-Prozess erfolgt. In *Abb. 8* ist eine aufgetragene CuPMo-Pseudolegierung dargestellt. Die Aufmischung mit dem verwendeten Stahlsubstrat (1.4301) ist äußerst gering. Die eingebrachte Energie ist dementsprechend geeignet gewählt, um ein Aufschmelzen des Kupfer-Phosphor-Lotes zu ermöglichen. Gleichzeitig wird das darunter befindliche Substrat nicht thermisch geschädigt.

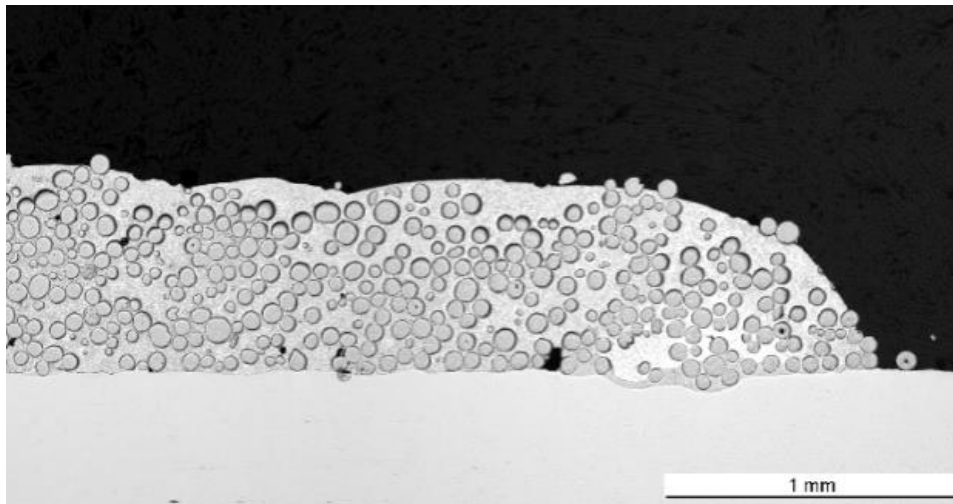


Abb. 8: Additiv aufgetragene CuPMo-Pseudolegierung auf Stahlsubstrat (1.4301)

Das resultierende Gefüge weist im Vergleich zu den ofenbasiert generierten Proben einige Besonderheiten auf. Hintergrund sind die veränderten Abkühlbedingungen bedingt durch die hohen Temperaturgradienten, wodurch es zum einen zu einer ausgeprägten Orientierung der sich ausbildenden Kupferdendriten kommt (vgl. *Abb. 9a*) und zum anderen ein feinst-lamellares eutektisches Gefüge aus phosphorarmen und -reichen Phasen gebildet wird (vgl. *Abb. 9b*).

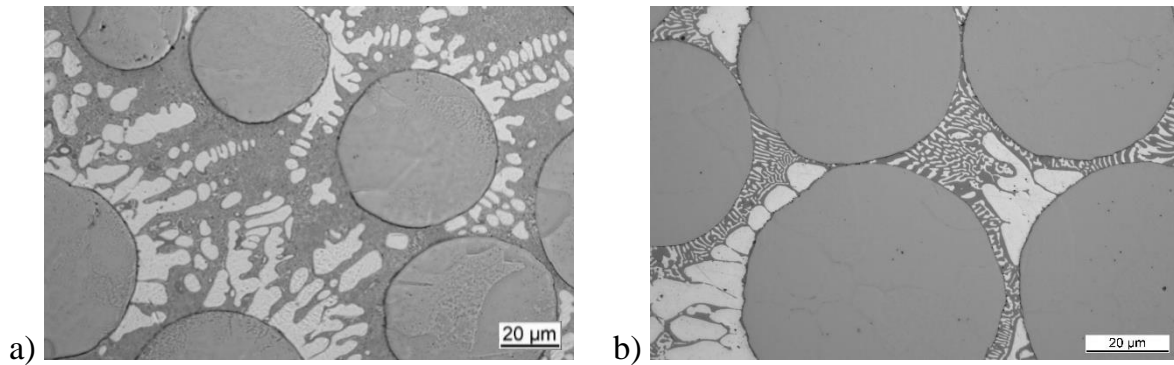


Abb. 9: Schliffaufnahmen der additiv verarbeiteten CuPMo-Pseudolegierung mit Dendri-
tenorientierung (a) und lamellarem CuP-Gefüge (b)

Dabei kommt es auch unter den veränderten Temperaturbedingungen zur Ausbildung von Molybdän-Phosphor-Phasensäumen um die Molybdän-Körner. Jedoch sind diese in den Ausmaßen signifikant schmäler, da die Diffusionsvorgänge aufgrund kurzer Abkühlzeiten im LMD-Prozess einen deutlich geringeren Umfang aufweisen.

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass die additive Verarbeitung von Pseudolegierungen einen innovativen Ansatz darstellt. Hierbei lassen sich gezielt die Eigenschaften der verschiedenen Legierungsbestandteile kombinieren und adaptieren.

Durch die Kombination von Kupfer und Molybdän lässt sich dadurch auch für klein- und mittelständische Unternehmen mit industriellen Lasieranlagen eine Verarbeitung von Kupferwerkstoffen sinnvoll umsetzen, durch verbesserte Absorption von Infrarot-Wellenlängen und damit einhergehender gesteigerter Prozesssicherheit.

Die Werkstoffentwicklung legt nahe, dass durch die Beimischung von Phosphor eine verbesserte Benetzung und somit verbesserte Formfüllung der Molybdänpartikel erreicht werden kann. Gleichzeitig kann von einem verringerten Schmelzpunkt und der verbundenen verminderten Gefahr einer thermischen Schädigung des kristallinen YAG profitiert werden.

Eine zusätzliche Beigabe von Mangan kann darüber hinaus dazu beitragen, dass die Benetzung von Metall zu Nichtmetall gesteigert werden kann.

In den nachfolgenden Untersuchungen soll die Kombination von Pseudolegierung und YAG auf den additiven Prozess übertragen werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass durch die hohen Temperaturgradienten die Thermoschockgefahr des YAG-Kristalls signifikant erhöht ist. Dementsprechend muss eine Vorwärmung des Kristalls in Betracht gezogen werden. Ein weiterer Fokus beim Eindrucken liegt auf den geringfügig

abweichenden thermischen Ausdehnungen von YAG zur Legierung sowie den dadurch induzierten mechanischen Spannungen.

Darüber hinaus wird die Charakterisierung derartiger Pseudolegierungen weiterführend untersucht. Insbesondere geht es hierbei um die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes sowie die Unterschiede zwischen additiver und ofenbasierter Verarbeitung.

6 Danksagung

Diese Arbeit ist im Rahmen des Projektes „wGROTESK - Werkstoffsysteme zur generativen Fertigung von OTS-Komponenten“ (ZW6-85018048) entstanden. Wir danken dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und dem niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur für die Finanzierung und Unterstützung.

Literatur

- [1] Sawruk, N. W.; Bruns, P. M.; Edwards, R. E. et al.: ICESat-2 laser Nd:YVO4 amplifier. Proc. SPIE 10513, Components and Packaging for Laser Systems IV, 105130X (2018), <https://doi.org/10.1117/12.2292256>
- [2] Wayne, K.: Middle-Infrared Laser Sources. (2016). 10.13140/RG.2.1.3105.2565 (DOI)
- [3] Kim, D.-L.; Kim, B.-T.: Fracture characteristics of ceramic Nd:YAG. Opt. Express. 22(9), 11331–11339 (2014).
- [4] Qiu, C.; Adkins N. J. E.; Attalah, M. M.: Selective laser melting of Invar 36: Microstructure and properties. Acta Materialia 103:382-395 (2015), 10.1016/j.actamat.2015.10.020 (DOI)
- [5] Yakout, M.; Cadamuro, A.; Elbestawi, M. A.; Veldhuis, S. C.: The selection of process parameters in additive manufacturing for aerospace alloys. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume 92, pages 2081–2098 (2017)
- [6] DIN 17745:2002-09: Knetlegierungen aus Nickel und Eisen. Berlin: Beuth Verlag.
- [7] Neef, P.; Bernhard, R.; Wiche, H.; Wesling, V.: Laser-based Additive Manufacturing of Optical, Thermal and Structural Components. In: da Silva L., Martins P., El-Zein M. (eds) Advanced Joining Processes. Advanced Structured Materials, vol 125. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2957-3_4

- [8] Bernhard, R.; Neef, P.; Wiche, H.; Wesling, V.; Hoff, C.; Hermsdorf, J.; Kaierle, S.: Process development for additive multi-material components. Proc. Lasers in Manufacturing (LiM) (2019)
- [9] Sun, A.; Liu, Y.; Wang, D.; Zhou, Z.: Sintering Behavior and Properties of Mo-Cu Composites. Advances in Materials Science and Engineering Volume 2018, Article ID 8703986, <https://doi.org/10.1155/2018/8703986>
- [10] Schubert, T.; Weidmüller, H.; Weißgärber, T.; Kieback, B.: Kupfer-Verbundwerkstoffe für passive Kühlkörper in der Elektronik. METALL 61. Jahrgang 11/2007 Seiten 752-756
- [11] Hoff, C.; Otero, N.; Hermsdorf, J.; Kaierle, S.; Overmeyer, L.: Konditionierung von Kupferwerkstoffoberflächen zur Stabilisierung des Dauerstrich-Lasermikroschweißens. METALL 69. Jahrgang 11/2015 Seiten 439-442
- [12] Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung. Micro Epsilon. <https://www.micro-epsilon.de/download/products/dat--infrarot-grundlagen--de.pdf> (letzter Abruf: 16.12.2020)
- [13] Schnee, D.: Grundlagen des Lötens. Technical Materials BrazeTec. https://saxonia-tm.de/Brazetec/de/Downloads/Technisches%20Know-How/show_02357_BR_Brazetec_Grundlage_Loeten_MON15_low_einzel.pdf (letzter Abruf: 16.12.2020)
- [14] Löten von Kupfer und Kupferlegierungen. Deutsches Kupferinstitut 2015. https://www.kupferinstitut.de/wp-content/uploads/2019/08/Broschuere_Loeten.pdf (letzter Abruf: 16.12.2020)

Autorenanschriften

Philipp Neef

Technische Universität Clausthal
Clausthaler Zentrum für Materialtechnik
Leibnizstraße 9
38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-723335

Telefax: 05323-723399

E-Mail: philipp.neef@tu-clausthal.de